

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

FRANCIS FREITAS DE TOLEDO BARROS

DETERMINAÇÃO DA TAXA DE PERMEABILIDADE AO
VAPOR DE ÁGUA E OXIGÊNIO: aplicação em
embalagens plásticas flexíveis da Indústria Alimentícia

SÃO CARLOS -SP
2022

FRANCIS FREITAS DE TOLEDO BARROS

DETERMINAÇÃO DA TAXA DE PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA E OXIGÊNIO:
aplicação em embalagens plásticas flexíveis da Indústria Alimentícia

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Química da Universidade Federal de São Carlos como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Química.

Orientador: Prof. Dr. Renato Lajarim Carneiro.

“... Ao ser perguntado sobre o que o homem deveria compreender melhor, o escritor português José Saramago disse: ‘as diferenças’. Sem perceber, o homem quer que tudo seja igual, e destrói tudo que é ‘diferente’. Talvez nossa salvação esteja em respeitarmos as diferenças existentes.”

Eliana Tereza de Freitas

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Maria Auxiliadora e minha avó Anna Luiza.

AGRADECIMENTO

A concretização deste trabalho de conclusão de curso, bem como a graduação em si, contou com o apoio de muitas pessoas, sem as quais não se realizaria.

A UFSCar, o professor e meu orientador Dr. Renato, todos os professores que tive, em especial os do Departamento de Química, pelo apoio, incentivo e todo conhecimento que foi compartilhado dentro e fora da sala de aula, que foram essenciais para a minha formação educacional e profissional.

A minha mãe, Maria Auxiliadora, que me deu a vida, me criou e faz parte da pessoa que me tornei hoje. Uma mulher extremamente batalhadora, esforçada e brilhante. Sem você, que sempre acreditou no meu potencial, nada disso seria possível. Muito obrigada por tudo, pelo incentivo, apoio, paciência e por ser quem você é.

A minha avó materna, Anna Luiza, minha segunda mãe, que ajudou a me criar e também faz parte da pessoa que me tornei hoje. Sem você e minha mãe nada disso teria sido possível. Uma mulher guerreira, de muita fibra e coragem, meu muito obrigada por tudo. Sei que do céu você é a estrela mais brilhante torcendo por mim.

Ao meu pai, Eduardo, que me apoiou a seguir a carreira que eu escolhi. Um homem muito inteligente e trabalhador que me ensinou muito sobre isso, sem você isso não seria possível, muito obrigada.

Aos meus avós paternos, Semíramis e Milton, que mesmo distantes sempre acreditaram e torceram por mim, muito obrigada por tudo. Nos deixaram tão cedo, mas sei que também estão no céu torcendo por mim.

A todos meus familiares de Mato Grosso, Minas Gerais e São Paulo, que de alguma forma acreditaram e torceram por mim.

Aos meus irmãos, Mário e Marcela, que mesmo distantes fizeram e fazem parte deste caminho, torcendo e acreditando em mim. Tenho muita sorte em tê-los como irmãos.

Ao Alexandre, meu melhor amigo, que também faz parte de toda essa jornada, e é uma parte da pessoa que me tornei hoje. Uma pessoa extremamente inteligente, esforçada e estudiosa. Parte fundamental de todo esse trajeto, meu muito obrigada.

A todos os amigos que fizeram parte de tudo isso, em especial o Diego, Daiane, Ana Julia, Gabriel Ferraz, Paula, Daniel, Leonardo, Mateus Costa, Milena, Edgard. Com vocês toda essa trilha se tornou mais leve e prazerosa, muito obrigada.

Aos meus amigos de Cuiabá e todos que fizeram parte da construção do meu trajeto que me trouxe até aqui, sou muito grata a cada um de vocês.

Por fim, a PepsiCo e a todos que conheci durante esse período de estágio. Em especial a minha gestora Liziane, Maysa, Livia, Montserrat, Dmitriy e Carina, que foram pessoas essenciais para em todo esse aprendizado e meu crescimento profissional, muito obrigada.

RESUMO

Embalagens têm inúmeras funções, dentre elas a de proteger um produto. Sendo essa proteção associada majoritariamente a dois aspectos. O primeiro se trata da proteção contra danos físicos e mecânicos durante transporte e armazenagem. O segundo, se tratando especificamente de alimentos, com a proteção contra fatores ambientais, tais como gases, vapor de água, luz e odores. Dessa forma, uma embalagem deve ter uma barreira adequada que impeça ou dificulte o contato entre o ambiente externo e o produto em seu interior. Assim, se fazem análises específicas que verifiquem essa barreira que a embalagem consegue prover, ou seja, o quanto ela é permeável ou não a esses fatores, como a taxa de permeabilidade ao vapor de água e oxigênio. Em se tratando de embalagens da indústria alimentícia, deve-se atentar a esses fatores, pois o oxigênio em contato com alimentos permite o crescimento de microrganismos aeróbios deteriorantes, e o aumento de umidade, em alimentos de baixa atividade de água, favorece o crescimento microbiano, a oxidação de gorduras, perda de crocância, entre outros. Nesse sentido, o presente trabalho teve por objetivo avaliar, na forma de revisão bibliográfica, as medidas para determinação da taxa de permeabilidade ao vapor de água e ao oxigênio aplicadas em embalagens plásticas flexíveis da indústria alimentícia.

Palavras-chave: Embalagem; Permeabilidade ao vapor de água; Permeabilidade ao oxigênio.

ABSTRACT

Package has multiple functions, including protecting a product. This protection is mainly associated with two aspects. The first is the protection against physical and mechanical damage during transport and storage. The second, dealing specifically with food, is the protection against environmental factors, such as gases, water steam, light and odors. Thus, a package must have an adequate barrier that prevents or hinder a contact between the external environment and the product inside. Therefore, specific analyzes are necessary to verify this barrier that the package can provide, that is, how permeable or not it is to these factors, such as the permeability rate to water steam and oxygen. Since when it comes to the food industry, attention should be paid to these factors, because the oxygen in contact with food allows the growth of spoilage aerobic microorganisms, and the increase in humidity, in foods with low water activity, favors the growth of microbial growth, fat oxidation, loss of crunchiness, among others. In this sense, the present work focused to evaluate, in the form of a bibliographic review, the analyzes to determine the permeability rate to water steam and oxygen applied to flexible plastic package used in the food industry.

Keyword: Package; Oxygen permeability; Water steam permeability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Valor bruto da produção de embalagens	9
Figura 2 - Valor bruto da produção de embalagens por setores	9
Figura 3 - Esquema da permeação de gases e vapores através de materiais poliméricos	15
Figura 4 - Estrutura de laminação	16
Figura 5 - Célula de difusão 100 % UR PERMATRAN-W 3/34 (MOCON®)	19
Figura 6 - Equipamento Mocon® Permatran-W 3/34. Visão geral à esquerda (A) e célula de difusão inferior (B) à direita	20
Figura 7 - Gabarito para PERMATRAN-W 3/34 e OX-TRAN 2/22 (MOCON®)	21
Figura 8 - Célula de difusão do OX-TRAN 2/22 (MOCON®)	25
Figura 9 - Equipamento Mocon® OX-TRAN 2/22 (A) à esquerda e células de difusão (B) à direita	27

LISTA DE ABREVIATURAS

ABRE	Associação Brasileira de Embalagens
ONU	Organização das Nações Unidas
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
aW	Atividade de Água
PET	(Poli)tereftalato de Etileno
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
TPVA	Taxa de Permeabilidade ao Vapor de Água
TPO ₂	Taxa de Permeabilidade ao Oxigênio
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ISO	Organização Internacional de Normalização
BPF	Boas Práticas de Fabricação
PRR	Programa de Pré-Requisitos
APPCC	Análise de Perigo e Pontos Críticos de Controle
GSFI	Global Food Safety Initiative
SI	Sistema Internacional de Unidades
ASTM	American Society for Testing and Materials
PVA	Permeabilidade ao Vapor de Água
BS	British Standards
DIN	Deutsches Institut für Normung
WVTR	Water Vapor Transmission Rate
UR	Umidade Relativa
SCCM	Standard cubic centimeters per minute
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
EVOH	Copolímero de Etileno e Álcool Vinílico
PPM	Partes Por Milhão

SUMÁRIO

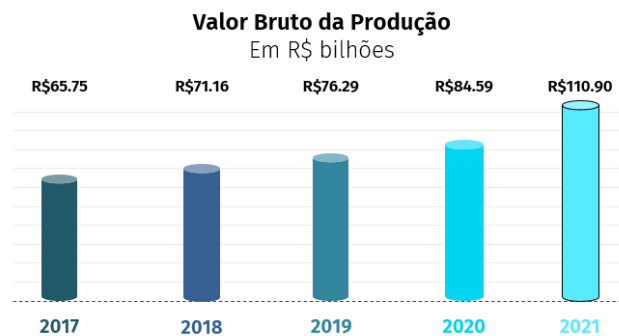
1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
3	EMBALAGENS	11
3.1	EMBALAGENS PARA A INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA	12
3.2	PROPRIEDADES DE BARREIRA.....	12
3.3	ESTRUTURA QUÍMICA DAS EMBALAGENS PLÁSTICAS FLEXÍVEIS E CONCEITOS DE PERMEABILIDADE	14
3.4	IMPORTÂNCIA DAS ANÁLISES DE BARREIRA EM EMBALAGENS DA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA E CONTROLE DE QUALIDADE	16
4	MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÃO DA TAXA DE PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (TPVA)	17
4.1	DEFINIÇÃO	17
4.2	MÉTODOS.....	18
4.2.1	Método Astm F1249 e Astm E96 utilizando o equipamento Permatran- W 3/34 (Mocon®).....	18
5	MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÃO DA TAXA DE PERMEABILIDADE DO OXIGÊNIO (TPO₂)	22
5.1	DEFINIÇÃO	22
5.2	MÉTODOS.....	24
5.2.1	Método Astm D3985 E F1927 Utilizando O Equipamento Ox-tran 2/22 (Mocon®).....	24
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
	REFERÊNCIAS	29

1 INTRODUÇÃO

A economia é uma estrutura complexa com muitas facetas, e a importância da embalagem dentro desse sistema tem se tornando cada vez mais significativa. Os métodos atuais de preservação e distribuição de bens são uma parte tão essencial no dia a dia que acabam passando despercebidos e não se nota o quanto as técnicas modernas para o controle de qualidade dessas embalagens contribuem para o padrão de vida.

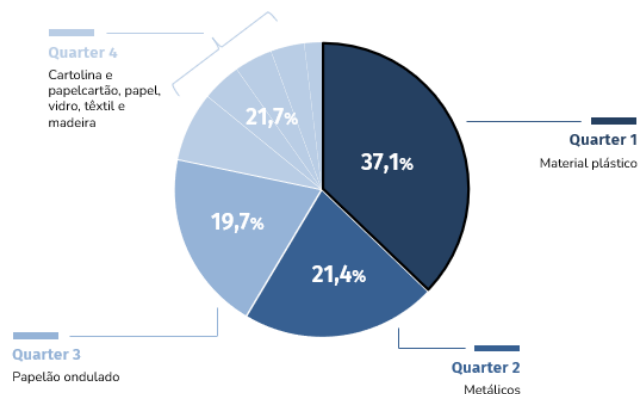
Para se ter uma ideia da magnitude da participação das embalagens na economia, de acordo com a pesquisa da ABRE (Associação Brasileira de Embalagem) em 2021 (Figuras 1 e 2), temos que os gastos com embalagens ultrapassaram R\$ 110 bilhões durante o ano de 2021 no Brasil, um aumento de cerca de 31 % com relação ao ano de 2020. Dos quais 37,1 % são para produção de plásticos, seguido pelo setor de embalagens de papel, cartolina, papel cartão e papelão ondulado, que juntos representam 31,7 %, embalagens metálicas com 21,4 %, vidro com 4,2 %, têxteis para embalagens com 3,7% e madeira com 1,9 % (ABRE, 2021).

Figura 1 - Valor bruto da produção de embalagens



Fonte: Adaptado de ABRE (2021)

Figura 2 - Valor bruto da produção de embalagens por setores



Fonte: Adaptado de ABRE (2021)

O crescimento do setor de embalagens superou a tecnologia necessária para o progresso e o desenvolvimento de forma ordenada. A embalagem, e um melhor transporte, possibilitaram centralizar as instalações de produção e tirar proveito de suas economias de operações em grande escala (ABRE, 2021). O produto e a embalagem estão se tornando tão interdependentes que não se pode considerar um sem o outro. As embalagens têm muitas faces. Em suas formas mais familiares, é a caixa na prateleira do supermercado e a embalagem de um chocolate. Ela também pode ser a caixa em torno de uma máquina ou um recipiente para produtos químicos. É arte e ciência; são materiais e equipamentos; é proteção, promoção, lei, logística e fabricação, tudo em um.

Assim, toda empresa, independentemente de sua categoria, se preocupa em garantir a segurança de seus produtos. Em um mercado competitivo como o atual e com consumidores cada vez mais informados e exigentes, as marcas não querem arriscar terem seus produtos devolvidos e se exporem a processos ou situações que possam colocá-las em risco. Não basta se preocupar com o design e marketing para o produto final, é necessário ter um controle de qualidade para evitar que o produto seja comprometido e possa causar danos à saúde do consumidor (SILVEIRA, 2019).

Como a qualidade da embalagem é fator primordial para manter as características do produto preservadas, a utilização de materiais regulamentados, em conformidade com as normas da indústria, evita perdas ou problemas de contaminação durante o transporte ou armazenamento. As embalagens podem ser voltadas para as indústrias de alimentos, autopeças, agropecuária, farmacêutica, hospitalar, veterinária, utilidades domésticas, entre outras. Dentre essas indústrias, a alimentícia merece atenção especial.

Visto que a população mundial é estimada a alcançar 9,7 bilhões em 2050, segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), a necessidade da produção de alimentos deve aumentar cerca de 70 % até o ano de 2050 de acordo com a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, do inglês *Food and Agriculture Organization of the United Nations*). Dessa forma, esse alto crescimento implica em um aumento exorbitante na demanda da produção de alimentos. Sendo assim, é inevitável o aumento na produção de embalagens para a indústria alimentícia.

De acordo com Sarantopoulos, et al., (2017), a embalagem alimentícia deve atuar como uma barreira ao vapor de água, oxigênio, odores, entre outros. Logo,

diversas análises são necessárias para desenvolver embalagens e realizar seu controle de qualidade. Exemplos de tais análises são a medida da taxa de permeabilidade ao vapor de água e ao oxigênio. E esta monografia foi motivada pelo estágio realizado na PepsiCo de Sorocaba, de agosto de 2021 a novembro de 2022, na área de pesquisa e desenvolvimento de embalagens, pois tinha como um dos objetivos o estudo da permeabilidade ao vapor de água e oxigênio de embalagens plásticas flexíveis para alimentos.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a revisão bibliográfica de duas análises essenciais de barreira em embalagens plásticas flexíveis da indústria alimentícia para a determinação da taxa de permeabilidade ao vapor de água e ao oxigênio, utilizadas durante o estágio na PepsiCo. Juntamente com uma breve revisão acerca desse tipo específico de embalagem, suas propriedades, estrutura química, controle de qualidade, importância dessas análises e o cenário econômico/industrial do mundo das embalagens.

3 EMBALAGENS

As embalagens devem garantir a estabilidade química, física, sensorial e microbiológica de seus produtos para que estes preservem suas propriedades e seu tempo de validade (ou *shelf-life*), dependendo do produto a ser embalado. Embalagens adequadas são importantes em diversas indústrias, tais como alimentícia, farmacêutica, cosmética, entre outras, logo, deve-se levar em conta o que está sendo embalado (todas suas características), onde será armazenado, para onde será transportado e de que forma, e o consumidor alvo.

De acordo com o Grupo Ideia (2018), as embalagens podem ser classificadas em:

- Embalagem primária: fica em contato direto com o produto, é o que envolve ele. O foco desta monografia;
- Embalagem secundária: composta por uma ou várias embalagens primárias, podendo ser utilizada para o transporte ou não;

- Embalagem terciária: conjunto de embalagens primárias e/ou secundárias, é a embalagem que abriga essas outras, sendo a utilizada para o transporte.

3.1 EMBALAGENS PARA A INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

Existem várias opções de materiais, como plástico, vidro, alumínio, isopor, papel, entre outros. Para escolher os materiais corretos para alimentos e bebidas, é preciso entender que tipo de proteção esse produto específico precisa. É necessário analisar se precisa de barreira à umidade, odores, ar, luz ou gordura. Além de considerar alguns fatores, como se o produto em questão é frágil, perfurante, muito ácido, condições especiais de armazenagem, entre outros (FOOD CONNECTION, 2017).

O plástico flexível como embalagem primária, que é o foco desta monografia, se destaca pela boa relação entre a massa de embalagem e a quantidade de produto embalado e pela flexibilidade da embalagem final, acomodando o produto da forma desejada (SARANTOPOULOS, et al., 2017).

3.2 PROPRIEDADES DE BARREIRA

As propriedades de barreira estão relacionadas a uma barreira física criada pela embalagem para proteger o produto de fatores externos, e não devem ser confundidas com resistência química, que é a capacidade de um produto não ser afetado (solubilizado ou alterado) quando em contato com algum agente químico (SARANTOPOULOS, et al., 2017).

O oxigênio em contato direto com o produto pode causar a oxidação de óleos e gorduras, o que pode levar a sua rancificação. Com isso, os produtos perdem suas propriedades originais, passam a apresentar odor desagradável e inaceitável, além de que uma atmosfera oxidativa favorece o crescimento de microrganismos que degradam o produto, há perda de nutrientes, alterações na cor e sabor. Esta barreira é avaliada em termos de taxa de permeabilidade a gases, ou seja, através da quantidade de gás que passa através de uma unidade de área superficial do material da embalagem por unidade de tempo, a uma determinada temperatura e umidade relativa e sob certo gradiente de pressão parcial do gás permeante (GARCIA, et al., 1989).

A barreira de luz previne a ocorrência de catálise das reações de oxidação

como rancificação, oxidação dos pigmentos (alteração de cor) e das vitaminas (perda nutricional), aumentando seu tempo de validade (GARCIA, et al., 1989).

A barreira de água previne contra a perda e o ganho de umidade. Por exemplo, em caso de alimentos secos, como biscoitos, salgadinhos e leite em pó, a umidade favorece o aumento de atividade microbiana, oxidação da gordura, perda de textura, aumento de ações enzimáticas e alterações de cor devido a um escurecimento não enzimático. Nos alimentos com alto teor de água, como carne fresca ou queijo, a transferência de umidade do produto para o ambiente causa a perda de massa e promove a ocorrência de mudanças físico-químicas e organolépticas. Além disso, a barreira à umidade evita a contaminação do produto por odores externos indesejados, mantendo o aroma característico devido à retenção de seus componentes voláteis. Esta barreira é avaliada em termos da taxa de permeabilidade ao vapor d'água, ou seja, a quantidade de água que passa através de uma unidade de área do material da embalagem por unidade de tempo, a determinada temperatura e umidade relativa (GARCIA, et al., 1989).

A barreira contra gordura evita o dano visual e físico da embalagem, pois a penetração deste componente poderia comprometer a aparência do produto, tornando-o oleoso, grudento e interferindo na rigidez, resistência à delaminação, selagem e até na impressão (GARCIA, et al., 1989).

Então, se tratando de barreiras das embalagens, rancificação e atividade microbiana, para que se possa conservar os alimentos de forma correta deve-se entender a atividade de água nos alimentos, já que esta permite avaliar a disponibilidade de água em um alimento que pode estar susceptível a reações (químicas, enzimáticas) ou utilizada por microrganismos presentes. Assim, quanto mais elevada for a atividade da água, mais rapidamente os microrganismos, como bactérias, poderão se multiplicar. A atividade da água de um alimento não é a mesma coisa que seu teor de humidade, e a fim de que um alimento tenha um período de vida útil adequado é necessário controlar ou o seu nível de acidez (pH), ou o nível de atividade da água (aW) ou uma combinação harmônica dos dois. (AMBIFOOD, 2016).

Portanto, as propriedades de barreira necessárias a uma embalagem devem ser definidas para cada produto, levando em conta a composição do produto, a apresentação, a forma de acondicionamento, o canal de distribuição e a durabilidade desejada.

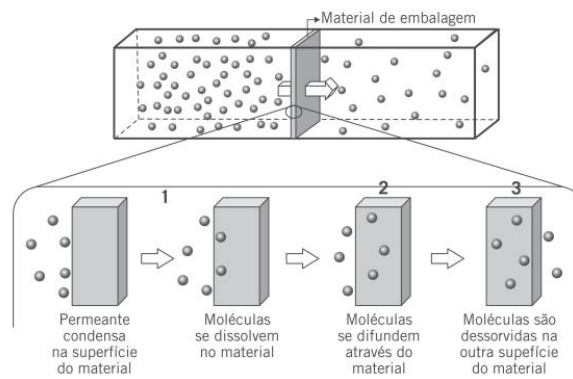
3.3 ESTRUTURA QUÍMICA DAS EMBALAGENS PLÁSTICAS FLEXÍVEIS E CONCEITOS DE PERMEABILIDADE

Os plásticos são polímeros orgânicos de alto peso molecular que podem ser sintetizados a partir de petróleo ou gás natural, ou derivados de compostos naturais que são obtidos a partir de recursos renováveis (biopolímeros) (HARPER, 2003). Os polímeros podem ter macromoléculas lineares ou ramificadas. Em ambos os casos, a interação entre as macromoléculas ocorre por meio de forças fracas do tipo Van der Waals, podendo haver contribuição de ligações de hidrogênio e, em alguns casos, forças de atração iônicas. Essas características permitem o processamento contínuo e a conformação por aquecimento, característica dos polímeros termoplásticos. (CANEVAROLO, 2002).

Em sua forma sólida, os polímeros termoplásticos podem assumir uma estrutura amorfa, se o arranjo das moléculas for aleatório, ou semicristalina, se as moléculas se alinharem. Os polímeros amorfos, pela composição química de seu monômero e/ou pela presença de substituições com muito volume, não possuem uma tendência a formar regiões cristalinas. Já uma estrutura linear e ramificações menores favorecem o alinhamento e uma maior proximidade entre as cadeias, aumentando o grau de cristalinidade de polímeros semicristalinos, a densidade e a interação entre as cadeias (CANEVAROLO, 2002).

As variáveis mais significativas dos materiais de embalagem relacionadas à permeabilidade são a área e a espessura do material e algumas propriedades moleculares do polímero que a compõem. Dessa forma, é importante ressaltar que a difusão ocorre na embalagem à medida que o permeante se move através dos vazios formados no polímero devido a gradientes de pressão ou concentração (Figura 3). A taxa de difusão depende do número e tamanho desses vazios e da facilidade com que eles se formam. O número e o tamanho desses vazios estão relacionados ao volume livre no polímero, e a densidade está relacionada ao quão compactas são as cadeias. A facilidade com que esses vazios são formados depende da rigidez das cadeias e das forças de ligação no polímero (SARANTOPOULOS, et al., 2017).

Figura 3 - Esquema da permeação de gases e vapores através de materiais poliméricos



Fonte: Sarantopoulos, et al. (2017)

Alterações no polímero que ocasionam o aumento da densidade, orientação e cristalinidade resultam em diminuição da permeabilidade, pois tendem a diminuir o coeficiente de difusão. De forma geral, a densidade de um polímero está relacionada aos vazios existentes na estrutura. Portanto, levando em conta uma mesma classe de polímeros, quanto menor a densidade, mais permeável é o material, devido ao maior espaço livre para o permeante (SARANTOPOULOS, et al., 2017).

Para polímeros amorfos, o alinhamento parcial das moléculas (orientação) reduz a permeabilidade ao redor de 10 % a 15 %, mas em polímeros cristalinos, a redução pode ultrapassar 50 % (ASHLEY, 1986). Assim, quanto maior o grau de cristalização melhor será a barreira, visto que as regiões cristalinas são impermeáveis devido ao menor espaço livre existente proveniente do arranjo estrutural (SARANTOPOULOS, et al., 2017).

A composição das embalagens plásticas em indústrias alimentícias, são em sua grande maioria, uma combinação de camadas laminadas de PET ((poli)tereftalato de etileno) e PEBD (polietileno de baixa densidade), além de tinta e adesivo entre elas, e em alguns casos em que se deseja uma barreira mais eficiente ainda a gases, se acrescenta uma camada extra metalizada de PET (Figura 4) (GARCIA, et al., 1986). Normalmente o PET, que é um polímero semicristalino, situa-se na camada exterior devido a sua alta barreira a gases e média barreira ao vapor de água, e o PEBD se localiza na camada mais interna devido a sua alta barreira ao vapor de água e média barreira a gases (EBNESAJJAD, 2012).

Figura 4 - Estrutura de laminação



Fonte: Autoria própria (2022)

3.4 IMPORTÂNCIA DAS ANÁLISES DE BARREIRA EM EMBALAGENS DA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA E CONTROLE DE QUALIDADE

Dessa forma, se tratando de embalagens para alimentos, a taxa de permeabilidade ao vapor de água (TPVA) e a taxa de permeabilidade ao oxigênio (TPO₂), se fazem extremamente necessárias e importantes na hora do desenvolvimento e controle de qualidade de embalagens para alimentos. Em alguns casos são necessárias ainda análises de barreira para vapores orgânicos, óleos e gorduras e outros (AMINI, et al., 1979).

O controle de qualidade deve ser feito obedecendo às normas, padrões, procedimentos acordados com os fornecedores e com os órgãos de regulação como a ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária). Para ser considerado um fornecedor de embalagens homologado na indústria de alimentos, é fundamental possuir a certificação na norma ISO (Organização Internacional de Normalização) 9001 em sistemas de gestão da qualidade. Além disso, as exigências têm aumentado e novos programas de qualidade e segurança de alimentos têm sido exigidos ao mercado de embalagens, como o programa BPF (boas práticas de fabricação), PRR (programa de pré-requisitos), APPCC (Análise de perigos e pontos críticos de controle) *Food Fraud* e *Food Defense*. Além disso, ocorrem auditorias para homologação de fornecedores de embalagens baseadas nos programas citados e/ou a certificação em uma norma de segurança de embalagens para alimentos reconhecida pelo GFSI (*Global Food Safety Initiative*) (SILVEIRA,2019).

4 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÃO DA TAXA DE PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (TPVA)

4.1 DEFINIÇÃO

A mensuração da capacidade de uma embalagem à difusão de água é dada pela propriedade de Taxa de Permeabilidade ao Vapor de Água, esta é definida como a quantidade de água que passa por uma unidade de área em estado estacionário. Os valores são obtidos em $g (100 \text{ in}^2)^{-1} \text{ dia}^{-1}$ no sistema de medida americano e em $g \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ no SI (Sistema Internacional de Unidades) (SARANTOPOULOS, et al., 2017).

De acordo com a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) F1249, 2013, esta taxa é expressa em:

$$[TPVA] = \frac{g[H_2O]}{m^2 \cdot dia}$$

A PVA (permeabilidade ao vapor de água) refere-se ao produto da taxa de permeabilidade pela espessura do material, dividido pelo gradiente de pressão presente entre ambas as superfícies do material. Essa relação está apresentada na ASTM F1249, 2013, e só é válida para materiais homogêneos.

$$[PVA] = \frac{g[H_2O] \cdot \mu m}{m^2 \cdot dia \cdot mmHg}$$

A transmissão de gases e vapores de água através dos filmes é feita por difusão que é dependente da estrutura do material. Primeiro ocorre adsorção e permeação, seguida pela difusão, a uma taxa constante, ativada pelo gradiente de concentração, resultando na migração das substâncias de uma superfície para a outra (SARANTOPOULOS, et al., 2017).

Como visto, diversos fatores afetam a permeabilidade do filme, como tamanho, formato e arranjo molecular das cadeias. Quanto maior as moléculas (maior o peso molecular médio) e/ou maior a simetria molecular, menor será a permeabilidade. Maiores ramificações ou maior distanciamento das cadeias poliméricas causam o aumento da permeabilidade (GARCIA, et al., 1989).

Dependendo do material, fatores como pressão e temperatura podem ser influentes na permeabilidade do filme. Em situações em que os gases apresentam elevada afinidade (interação) com o filme, por exemplo vapor de água com celofane, ocorre um aumento da permeabilidade com o aumento da pressão (ASHLEY, 1986).

É fundamental estabelecer um limite de permeação máxima para cada embalagem sem tornar o produto inaceitável para consumo, e este deverá estar expresso na especificação. As condições de análise podem não representar fielmente a condição real, porém, ao padronizar os parâmetros de análises é possível estudar comparativamente os materiais.

4.2 MÉTODOS

Buscando nas normas da ASTM, encontra-se várias técnicas para medir a TPVA, que vão desde técnicas gravimétricas que medem a variação de peso através do ganho ou perda de umidade por massa, até técnicas instrumentais extremamente sofisticadas que em alguns projetos podem medir taxas de permeabilidade muito baixas, o que não é possível por muitas técnicas, devido à baixa resolução delas. Outros métodos padrão também são descritos na ISO, ASTM, BS (*British Standards*), DIN (*Deutsches Institut für Normung*), entre outros.

Levando em conta embalagens flexíveis utilizadas em indústrias alimentícias, onde é necessário uma alta sensibilidade na medida de permeabilidade, esta revisão bibliográfica será baseada na ASTM F1249 - Método padrão de teste para taxa de transmissão de vapor de água através de filme plástico e folha usando um sensor infravermelho modulado, e na ASTM E96 - Métodos de teste padrão para transmissão de vapor de água de materiais. Ambos os métodos foram realizados utilizando um equipamento da Mocon.

4.2.1 Método Astm F1249 e Astm E96 utilizando o equipamento Permatran-W 3/34 (Mocon®)

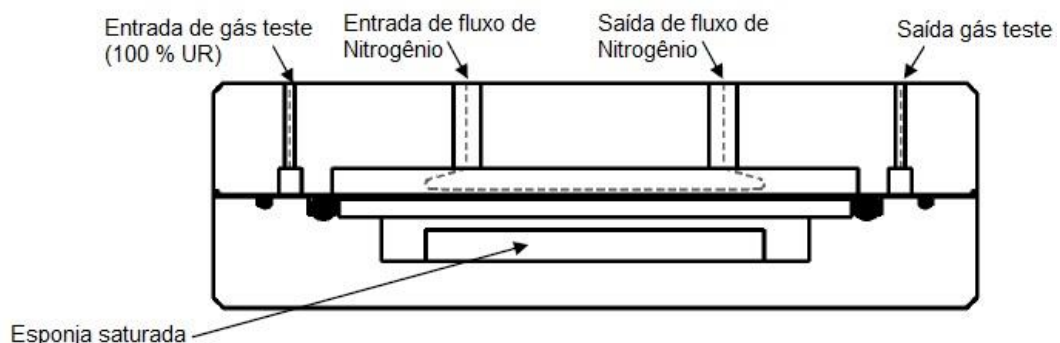
A metodologia é descrita para determinação da taxa de transmissão de vapor de água através de filme plástico e folha usando um sensor infravermelho modulado.

Assim, esse equipamento pode ser utilizado para análises rápidas de TPVA. O filme testado é posicionado dentro de uma célula de difusão, esta célula é composta por duas peças, uma composta por esponjas umedecidas com água destilada. Na outra parte circula o gás de arraste (nitrogênio seco) em fluxo constante. Assim, o gás teste de concentração conhecida, geralmente 100 % de UR (Umidade Relativa), ou seja, vapor de água, é aplicado a um lado do material de barreira a ser testado e o outro lado é varrido com um gás de arraste isento de vapor d'água (nitrogênio) que

carrega o gás teste até o sensor de infravermelho. Este sensor mede a fração de energia infravermelha que é absorvida pelo vapor de água e emite uma resposta em forma de um sinal elétrico com uma amplitude proporcional à concentração de gás teste (vapor de água) que conseguiu permear pelo filme. Então, o sinal é comparado com um padrão, valor de WVTR (Water Vapor Transmission Rate) conhecido medido com um material de calibração, e com isso é possível calcular o valor de TPVA do filme analisado (ASTM F1249, 2013; MOCON, s.d.).

A Figura 5 ilustra um esquema de uma célula de difusão.

Figura 5 - Célula de difusão 100 % UR PERMATRAN-W 3/34 (MOCON®)



Fonte: Adaptada do manual do equipamento (MOCON. **Permatran – W 3/34**. Minneapolis: Mocon Modern Controls, Inc., [s.d.]. v. 1, revision B, part number 143-196. 90 p. (Operator's Manual).)

O sensor de vapor de água no PERMATRAN-W Modelo 3/34 é um detector infravermelho modulado por pressão. O sistema de medição consiste em uma bomba de fole, uma câmara de detecção, uma fonte de radiação infravermelha, um filtro infravermelho com 2,6 micrômetros de tamanho, um fotodetector de sulfeto de chumbo e um amplificador (MOCON, s.d.).

A bomba varia a pressão e a densidade da mistura de gás na câmara de detecção. Como a pressão e a densidade da mistura gasosa variam, o teor de vapor d'água pode aumentar, aumentando a absorção de energia infravermelha, que responde ao teor de água. O detector Infravermelho está conectado a um amplificador de baixo ruído, sendo o sinal amplificado, filtrado e convertido em um sinal de corrente contínua que é diretamente proporcional ao vapor de água na exaustão da célula de teste. O sinal é, portanto, proporcional à permeabilidade de vapor de água do material (MOCON, s.d.).

O equipamento (Figura 6A), de acordo com Sarantopoulos (2017), consiste em:

- Célula de difusão constituída por duas peças metálicas com uma cavidade interna que, quando preparadas para análise, delimitam uma área de permeação (Figura 6B). A área de permeação é de 50 cm². Outras áreas podem ser utilizadas com a aplicação de máscaras de vedação;
- Sensor infravermelho com alta sensibilidade de forma ser capaz de diferenciar variações de 0,002% de UR no gás de arraste a 38 °C;
- O volume de difusão da célula não é crítico, mas deve ser o suficiente para permitir uma troca de gases rápida. Caso ocorra uma deflexão da amostra, esta não deve entrar em contato com a base da célula de difusão. Para uma célula com uma área de permeação de 50 cm² deve-se possuir 6 mm profundidade da cavidade interna;
- O selo de borracha entre as duas partes da célula é chamado de *O-RING* e sua vedação é feita com a aplicação de graxa de silicone para alto vácuo (Dow Corning - *HIGH VACUUM GREASE*) na região interna ao selo de borracha que define a área de permeação;
- O medidor de fluxo que controla o fluxo de nitrogênio seco (gás de arraste) e, opcionalmente, em alguns modelos o fluxo de nitrogênio é umidificado para alterar a umidade relativa;
- O gás de arraste (Nitrogênio - N₂) utilizados no sistema deve ser seco e com pureza de no mínimo 99,5 %;
- É recomendado utilizar o dissecante (Linde Molecular Sieve tipo 4A e 5A) em formato de pellets com mecanismo de mudança de cor (indica o aumento da umidade através da mudança de coloração de azul para rosa). Esse sistema é instalado na tubulação por onde circula o nitrogênio antes de entrar na célula de difusão com a finalidade de reduzir a UR para valores inferiores a 0,001 %.

Figura 6 - Equipamento Mocon® Permatran-W 3/34. Visão geral à esquerda (A) e célula de difusão inferior (B) à direita



Fonte: Autoria própria (2022)

O equipamento pode ser usado para determinar a taxa de permeação de água para materiais com espessura acima de 3 mm que possuam TPVA de 0,01 a 120 g de H₂O m⁻² dia⁻¹ (ASTM F1249, 2013; MOCON, sd) e estejam de acordo com os padrões de calibração. Esse tipo de equipamento é geralmente preferido para essa determinação, já que detecta níveis baixos e com rapidez.

Seguindo a norma ASTM F1249 e o manual do equipamento, as amostras devem ser abertas de modo a ficarem planas, sem conteúdo, higienizadas e em seguida cortadas utilizando um gabarito específico para o equipamento em questão (Figura 7). Após, deve-se aplicar a graxa de silicone de alto vácuo nas células de difusão e anexar as amostras. Em seguida, fecha-se as células e ajusta-se os parâmetros no equipamento.

Figura 7 - Gabarito para PERMATRAN-W 3/34 e OX-TRAN 2/22 (MOCON®)



Fonte: Autoria própria

Antes de começar o teste, os parâmetros de análises devem ser definidos e escolhe-se uma das quatro modalidades: *Standard*, *Convergence by Cycles*, *Convergence by Hours* e *Continuous*. A modalidade é escolhida dependendo do material a ser analisado e suas características. De acordo o manual do equipamento, (MOCON, s.d.), essas modalidades consistem em:

- *Standard*: O *Standard Test* (Teste Padrão) consiste em um número de ciclos de análises durante um tempo pré-estabelecido para o teste. Onde define-se o número de análises que serão realizadas em cada célula e o tempo (em minutos) de duração de cada análise. Por exemplo, ao incluir 8 como número de ciclos e o tempo de 30 minutos, o programado será de 8 análises para cada célula (com um total de 16), com duração de 30 minutos cada;
- *Convergence by Cycles*: Testes de convergências são usados quando os filmes possuem alta barreira ou quando não é possível determinar o tempo necessário para que o sistema entre em equilíbrio (quando a taxa de permeação de vapor

de água varia menos que 2 % ou $0,01 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Neste modo, serão realizadas análises até que os resultados obtidos sejam constantes, ou seja, até que o sistema alcance o equilíbrio. Indicando um número mínimo de ciclos, se ao final de todos os ciclos o resultado não for constante o equipamento seguirá realizando esses ciclos até que o equilíbrio seja atingido. O sistema reconhece que o equilíbrio foi alcançado quando a variação da taxa de permeabilidade é inferior a 2 % ou $0,01 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$;

- *Convergence by Hours*: Funcionamento similar ao *Convergence by Cycles*, porém ao invés de selecionar um número mínimo de ciclos, indica-se o tempo de duração de cada análise;
- *Continuous*: O modo *Continuous Test* realiza análises continuamente até o operador encerrá-la.

É importante ressaltar que as condições de análises devem ser constantes, ou seja, temperatura de acondicionamento de $38,0 \pm 0,50 \text{ }^\circ\text{C}$, fluxo automático de 10 SCCM (*Standard cubic centimeters per minute*) de nitrogênio seco e umidade relativa da célula de difusão de 90 %.

5 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÃO DA TAXA DE PERMEABILIDADE DO OXIGÊNIO (TPO₂)

5.1 DEFINIÇÃO

A TPO₂ é uma propriedade determinante na escolha do material para embalagens de produtos suscetíveis à oxidação. No entanto, apenas essa propriedade não é suficiente para garantir a estabilidade de um produto sensível ao oxigênio. É necessário levar em consideração o oxigênio já presente na embalagem, decorrente do espaço vazio deixado no pacote e a qualidade de selagem da embalagem (SARANTOPOULOS, et al., 2017). Esta propriedade é estabelecida pela ASTM D3985 (2010) e F1927 (2014) como a quantidade de oxigênio que permeia por uma unidade de área paralela à superfície por unidade de tempo, em certas condições de temperatura, umidade relativa e gradiente de pressão parcial de oxigênio.

A taxa de permeabilidade de oxigênio, de acordo com a ASTM F1927-14, é definida como o volume de oxigênio que atravessa uma unidade de área de um filme por unidade de tempo ocasionada pela diferença de gradiente de pressão entre ambos

dos lados do filme, sob condição de temperatura e umidade relativa constante. Os valores são obtidos, no SI, em $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, onde 1 mL (CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão) equivale a $44,62 \mu\text{mol}$ e 1 dia são $86,4 \times 10^3 \text{ s}$, mas pode ser comumente expressa em mL (CNTP) $\text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$.

De acordo com a ASTM F1927, 2014, esta taxa é expressa em:

$$[TPO_2] = \frac{\text{cm}^3 [O_2]}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$$

A permeabilidade do material, conhecida também como coeficiente de permeabilidade, é característica do material e somente é válida para material homogêneo. Esta relação, de acordo com a ASTM F1927-14, pode ser determinada quando espessura do material e a pressão parcial dos gases são conhecidas, através do produto da taxa de permeabilidade pela espessura do material, dividido pelo gradiente de pressão presente entre ambas das superfícies do material.

$$[PO_2] = \frac{\text{cm}^3 [O_2] \mu\text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{mmHg}}$$

Da mesma forma que ocorre para vapores de água, a transmissão de gases através dos filmes é feita por difusão que é dependente da estrutura do material. Primeiro ocorre adsorção e permeação, seguida pela difusão, a uma taxa constante, ativada pelo gradiente de concentração, resultando na migração das substâncias de uma superfície para a outra. Além disso, os fatores que afetam a permeabilidade do filme a gases são os mesmos vistos para a permeabilidade ao vapor d'água, como o tamanho, formato e arranjo molecular das cadeias (SARANTOPOULOS, et al., 2017).

Temperatura é um parâmetro de grande efeito sobre a TPO_2 e afeta a umidade relativa, até 5 % de UR / °C. Portanto, durante a execução do teste é necessário temperatura controlada para reduzir a variação dos resultados decorrentes da variação da temperatura e da umidade relativa (SARANTOPOULOS, et al., 2017).

Polímeros com grande afinidade à água (hidrofílicos), como poliamidas, EVOH (Copolímero de Etileno e Álcool Vinílico) e celofane, perdem eficiência na barragem de oxigênio quando estão em presença de alta umidade. Isso ocorre pois a água absorvida pelo material age como um plastificante, ocasionando a redução da energia de ativação que é necessária para que ocorra a difusão de oxigênio, o que favorece o aumento da taxa de permeação. Portanto, o controle da umidade relativa durante o condicionamento da amostra e seu teste é essencial para a determinação correta do

TPO₂ de materiais sensíveis à umidade (SARANTOPOULOS, et al., 2017).

É de fundamental importância determinar a quantidade de oxigênio máxima que pode permear por uma embalagem sem que o produto embalado tenha suas propriedades e seu tempo de prateleira prejudicados.

5.2 MÉTODOS

A medição da taxa de transmissão de oxigênio nos materiais de embalagem é realizada através de métodos de teste padrão, como da ASTM, que incluem:

- Método de teste padrão D3985 para taxa de transmissão de oxigênio através de filme plástico e folha usando um sensor coulométrico;
- Método de teste padrão F1307 para taxa de transmissão de oxigênio através de pacotes secos usando um sensor coulométrico;
- F1927 Método padrão de teste para determinação da taxa de transmissão de oxigênio, permeabilidade e permeância em umidade relativa controlada através de materiais de barreira usando um detector coulométrico;
- F2622 Método padrão de teste para taxa de transmissão de oxigênio através de filme plástico e folha usando vários sensores.

Existem ainda outros métodos de teste como o método de taxa de permeabilidade a gases determinada por aumento de concentração desenvolvido por Gilbert e Pegaz (1969).

Levando em conta embalagens flexíveis utilizadas em indústrias alimentícias, onde necessita-se de técnicas de alta sensibilidade, esta revisão bibliográfica focou na ASTM D3985 – Método padrão de teste para determinação da taxa de transmissão de gás de oxigênio através de filme plástico e folha usando um sensor coulométrico, e na ASTM F1927 - Método padrão de teste para determinação da taxa de transmissão de gás oxigênio, permeabilidade e permeância em umidade relativa controlada através de materiais de barreira usando um detector coulométrico.

5.2.1 Método Astm D3985 E F1927 Utilizando O Equipamento Ox-tran 2/22 (Mocon®)

A amostra de filme é fixada entre duas partições de uma célula de difusão, resultando em dois compartimentos que são mantidos sob pressão atmosférica. Em um dos compartimentos ocorre o fluxo, em modo contínuo, de gás de arraste

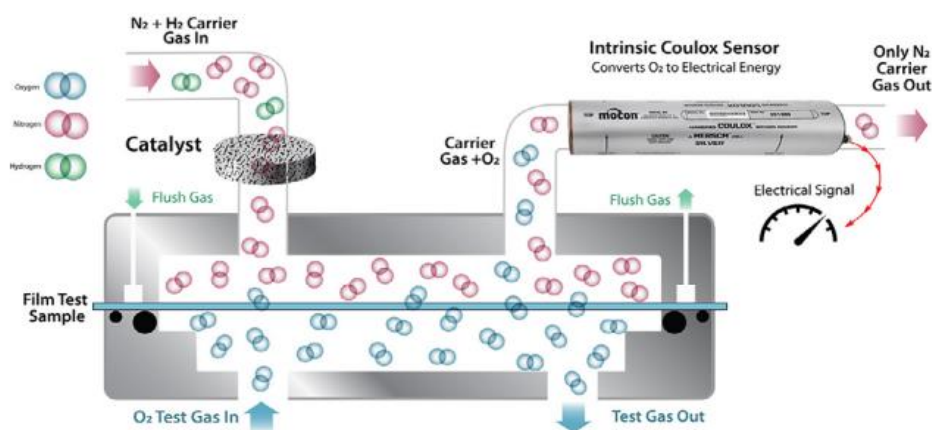
composto por uma combinação de nitrogênio e hidrogênio, enquanto no outro há o fluxo de gás oxigênio (gás permeante), puro ou combinado com outros gases, como os gases atmosféricos. Conforme ocorre a permeação através da embalagem, no lado oposto ao material ocorre o seu arraste pelo gás em circulação até um detector coulométrico. Ao passar por este detector há a geração de uma corrente elétrica de intensidade proporcional a quantidade de oxigênio que passa pelo detector por unidade de tempo. Durante o teste, a pressão total em ambos os lados da embalagem é constante, conforme o fluxo de gás de arraste e do gás permeante entra em contato com ambiente externo. Sendo assim este ensaio é baseado no método isostático (ASTM D3985, 2010; MOCON, s.d.).

A umidade relativa do gás permeante e do gás de arraste podem ser controladas individualmente, o que permite uma simulação de condições de estocagem, ambiente de mercado e condições internas da embalagem (ASTM D3985, 2010; MOCON, s.d.).

O sensor coulométrico é disponibilizado no mercado em diversas sensibilidades. A escolha de qual sensor utilizar depende da capacidade de barreira do filme analisado.

O procedimento permite a determinação do coeficiente de permeabilidade de oxigênio para materiais homogêneos ou quando a relação entre a taxa de permeabilidade de oxigênio e a espessura do material é conhecida. A Figura 8 apresenta um esquema da célula de difusão utilizando o equipamento OX-TRAN 2/22 (MOCON®) equipado com sensor coulométrico (SARANTOPOULOS, et. al., 2017).

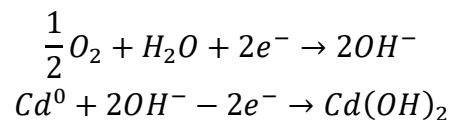
Figura 8 - Célula de difusão do OX-TRAN 2/22 (MOCON®)



Fonte: Adaptado do manual do equipamento (MOCON. **Ox-tran – 2/22**. Minneapolis: Mocon Modern

Controls, Inc., [s.d.]. v. 1, revision D, part number 143-195. 88 p. (Operator's Manual.)

O sensor de oxigênio Coulox, de acordo com o manual do equipamento OX-TRAN 2/22 (MOCON®), é uma célula de combustível que funciona de acordo com a Lei de Faraday. Quando exposto a oxigênio, o sensor gera uma corrente elétrica proporcional à quantidade de oxigênio que entra no sensor. O sensor tem um ânodo de cádmio e um cátodo de grafite. As reações catódicas e anódicas são, respectivamente:



Os elétrons criam uma corrente que pode ser usada para calcular a quantidade de oxigênio que entra no sensor Coulox. Como observado, cada molécula de oxigênio que entra no sensor resulta em quatro elétrons livres criando uma corrente elétrica. Um mol de oxigênio (22,4 litros a 0 °C e 760 mmHg) produziria quatro Faradays de corrente. Como um Faraday é 96.500 s A mol⁻¹, cada mol de oxigênio produzirá 4 x 96.500 = 3,86 x 10⁵ s A. Em termos mais práticos, 1 cm³ de oxigênio em 24 horas irá gerar 0,000199 Amperes de corrente (MOCON, s.d.).

O equipamento OX-TRAN 2/22 mede a taxa de permeabilidade ao oxigênio medindo diretamente a corrente produzida pelo sensor. O eixo vertical no gráfico do sensor é a corrente (1 contagem = ~ 10 pA). A corrente medida é então corrigida e dimensionada usando o ganho, pressão barométrica e área como é apropriado para o método de teste e para calibração do sensor especificado para a medição (MOCON, s.d.).

De acordo com Sarantopoulos, et al. (2017), o equipamento em questão com o sensor Coulox (Figura 9A) consiste basicamente em:

- Célula de difusão constituída por duas peças com uma cavidade interna que, quando preparadas para análise, delimitam uma área de permeação (Figura 9B). A área de permeação é de 50 cm². Outras áreas podem ser utilizadas com a aplicação de máscaras de vedação;
- O volume de difusão da célula não é crítico, mas deve ser o suficiente para permitir uma troca de gases rápida. Caso ocorra uma deflexão da amostra, esta não deve entrar em contato com a base da célula de difusão. Para uma célula com uma área de permeação de 50 cm² deve-se possuir 6 mm de profundidade na cavidade interna;

- O selo de borracha entre as duas partes da célula é chamado de O-RING e sua vedação é feita com a aplicação da graxa de alto vácuo APIEZON (*petrolatum hydrocarbon* sem aditivação para alto vácuo) na região interna ao selo de borracha que define a área de permeação;
- Medidor de fluxo que controla o fluxo de oxigênio (gás permeante) e o fluxo do gás de arraste;
- O sensor Coulox deve ter sensibilidade suficiente para detectar variações de $0.002 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em condições de $23 \text{ }^\circ\text{C}$. Este detector possui eficiência de 95 % a 98 % e pode ser considerado um padrão intrínseco;
- O gás de arraste é uma mistura de 98 % de nitrogênio e 2 % de hidrogênio que é utilizado juntamente com um catalisador para remover qualquer oxigênio residual do gás de arraste, e deve ser seco. Este gás deve ser uma mistura de nitrogênio e hidrogênio que promova a formação de uma corrente elétrica ao passar pelo detector, portanto, recomenda-se que a porcentagem de hidrogênio deva estar entre 0,5 % e 3,0 % por volume. Esta mistura não deve conter mais do que 100 ppm (partes por milhão) de oxigênio e deve ter mínimo de 99,5 % de pureza;
- O oxigênio, gás permeante, deve ser seco e possuir pureza mínima de 99,9 %;
- Não deve haver umidade nas células para a execução do teste de TPO_2 .

Figura 9 - Equipamento Mocon® OX-TRAN 2/22 (A) à esquerda e células de difusão (B) à direita



Fonte: Autoria própria (2022)

As amostras, a serem analisadas, devem ser abertas de modo a ficarem planas, sem conteúdo, higienizadas e em seguidas cortadas utilizando um gabarito específico para o equipamento em questão, o mesmo utilizado para a análise de TPVA

(Figura 7). Após, deve-se aplicar a graxa de silicone de alto vácuo nas células de difusão e anexar as amostras. Em seguida, fecha-se as células e ajusta-se os parâmetros no equipamento.

Antes de começar o teste, os parâmetros de análises devem ser preenchidos, nesta etapa escolhe-se uma das quatro modalidades: *Standard*, *Convergence by Cycles*, *Convergence by Hours* e *Continuous*. A modalidade é escolhida dependendo do material a ser analisado e suas características. De acordo com o manual do equipamento, (MOCON, s.d.), essas quatro modalidades são as mesmas vistas para a análise de TPVA.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como visto, o setor de embalagens para alimentos está crescendo cada vez mais e com a projeção de aumento da população esse setor tende a aquecer exponencialmente. Assim, a fim de poder fornecer ao consumidor um produto final de qualidade, a embalagem deve atuar como uma barreira à passagem de vapor de água, oxigênio, odores, entre outros. Fazendo-se necessário um adequado controle de qualidade aliado a análises que mensuram a permeabilidade ao vapor de água e ao oxigênio de embalagens plásticas da indústria alimentícia.

Por meio desta revisão bibliográfica, e do estágio realizado na Pepsico, foi possível aprender melhor sobre esse tipo de embalagem, sua estrutura química, conceitos de permeabilidade e barreira, e a sua importância. Além de compreender em profundidade as análises para determinar a taxa de permeabilidade ao vapor de água e ao oxigênio, o que são, como funcionam e como podem ser mensuradas.

REFERÊNCIAS

ABRE. Estudo ABRE macroeconômico da embalagem e cadeia de consumo. Apresentação março de 2022: retrospecto de 2021 e perspectivas para o ano de 2022. **ABRE – Associação Brasileira de Embalagem**, 2021. Disponível em: <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2021-2/>. Acesso em: 18 jul. 2022.

AMBIFOOD. Notícias – O que é a atividade da água. **Ambifood alimentar**, 2016. Disponível em: <https://www.ambifood.com/pt/noticias/o-que-e-a-atividade-da-agua/>. Acesso em: 27 set 2022.

AMINI, M. A.; MORROW, D. R. Leakage and permeation: theory and practical application. **Package Development & Systems**, v. 3, n. 9, p. 20-27, 1979.

ASBRAN. FAO revê demanda estimada por alimentos no mundo até 2050. **Associação Brasileira de Nutrição**, 2012. Disponível em: <https://www.asbran.org.br/noticias/fao-reve-demanda-estimada-por-alimentos-no-mundo-ate-2050>. Acesso em: 18 jul. 2022.

ASHLEY, R. J. Permeability and plastics packaging. In: COMYN, J. (Ed.) **Polymers permeability**. Barking: Elsevier, 1986. Cap. 7, p. 269-308.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3985-10**: Standard Test Method for Oxygen Gas Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Coulometric Sensor. West Conshohocken, 2010. 7 p.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E96-16**: Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. West Conshohocken, 2016. 14 p.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM F1249-13**: Standard Test Method for Water Vapor Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Modulated Infrared Sensor. West Conshohocken, 2013. 6 p.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM F1927-14**: Standard Test Method for Determination of Oxygen Gas Transmission Rate, Permeability and Permeance at Controlled Relative Humidity Through Barrier Materials Using a Coulometric Detector. West Conshohocken, 2014. 6 p.

CANEVAROLO JR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**. Artiliber editora, São Paulo, v. 24, 2002.

EBNESAJJAD, Sina (Ed.). **Plastic films in food packaging: materials, technology and applications**. William Andrew, 2012.

FISPAL TECNOLOGIA. Como escolher o tipo de embalagem de alimentos. **FOOD CONECTION**, 2017. Disponível em:

<https://www.foodconnection.com.br/tecnologia/como-escolher-o-tipo-de-embalagem-de-alimentos>. Acesso em: 19 ago. 2022.

GARCIA, E. E. C., PADULA, M., DANTAS, S., GARCIA, A. E. T. Materiais flexíveis metalizados para embalagem – II. Características de permeabilidade ao oxigênio, vapor d'água e transmissão de luz de filmes e laminados metalizados. **Coletânea do ITAL**, Campinas, v.16, p. 151-182, 1986b.

GARCIA, E. E. C.; PADULA, M.; SARANTOPOULOS, C. I. G. L. **Embalagens plásticas**: propriedades de barreira. Campinas: CETEA/ITAL, 1989. 44 p.

GILBERT, S. G., PEGAZ, D. Find new way to measure gas permeability. **Package Engineering**, Chicago, v.14, n. 1, p. 66-69, 1969.

GRUPO IDEIA. **Ideia em Embalagens**. 8 tipos de embalagem que você precisa conhecer!. Grupo Ideia, 2018. Disponível em: <https://ideiaembalagens.com.br/tipos-de-embalagem-que-voce-precisa-conhecer/>. Acesso em: 31 ago. 2022.

HARPER, Charles A.; PETRIE, Edward M. **Plastics materials and processes: a concise encyclopedia**. John Wiley & Sons, 2003.

MOCON. **Ox-tran – 2/22**. Minneapolis: Mocon Modern Controls, Inc., [s.d.]. v. 1, revision D, part number 143-195. 88 p. (Operator's Manual).

MOCON. **Permatran – W 3/34**. Minneapolis: Mocon Modern Controls, Inc., [s.d.]. v. 1, revision B, part number 143-196. 90 p. (Operator's Manual).

ONU. População mundial deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas em 2050, diz relatório da ONU. **Nações Unidas Brasil**, 2019. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/83427-populacao-mundial-deve-chegar-97-bilhoes-de-pessoas-em-2050-diz-relatorio-da-onu>. Acesso em: 18 jul. 2022.

SARANTÓPOULOS, C. I. G. L.; OLIVEIRA, L. M. de; PÁDULA, M.; COLTRO, L.; ALVES, R. M. V.; GARCIA, E. E. C.. **Embalagens Plásticas Flexíveis: Principais Polímeros e Avaliação das Propriedades**. CETEA / ITAL, Campinas. 2017.

SARANTÓPOULOS, C. I. G. L.; OLIVEIRA, L. M. de; PÁDULA, M.; COLTRO, L.; ALVES, R. M. V.; GARCIA, E. E. C.. **Ensaio para Avaliação de Embalagens Plásticas Flexíveis**. CETEA / ITAL, Campinas. 1996.

SILVEIRA, F. Normas de segurança de alimentos para embalagens. **Mundo do Plástico**, 2019. Disponível em: <https://mundodoplastico.plasticobrasil.com.br/colunistas/normas-de-seguranca-de-alimentos-para-embalagens>. Acesso em: 19 ago. 2022.